

# روش جدیدی برای طراحی و انتخاب پارامترهای کنترل کننده مد لغزشی در منابع تغذیه‌ی سوئیچینگ فلای بک

مهدی سلیمی<sup>۱</sup>

۱- مهندسی برق- الکترونیک، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل، ایران  
[m.salimi@iauardabil.ac.ir](mailto:m.salimi@iauardabil.ac.ir)

چکیده: با در نظر گرفتن سادگی پیاده‌سازی عملی، استفاده از کنترل مد لغزشی در مبدل‌های الکترونیک قدرت در سال‌های اخیر بطور چشمگیری گسترش پیدا کرده است. می‌توان برای تثبیت فرکانس کلیدزنی مبدل از روش کنترل معادل مد لغزشی در مبدل-های DC به DC استفاده کرد. در این حالت اغلب، پارامترهای کنترلی سیستم با سعی و خطا انتخاب می‌شود و به همین دلیل نمی‌توان در محدوده‌ی وسیعی از تغییرات نقطه‌ی کار سیستم، پایداری کنترل کننده را تضمین کرد. برای حل این مشکلات، در این مقاله روش جدیدی برای طراحی مرحله به مرحله کنترل کننده غیرخطی مد لغزشی و همچنین چگونگی تنظیم بهره‌های کنترلی آن در منابع تغذیه‌ی سوئیچینگ فلای بک ارائه شده است. همچنین با در نظر گرفتن نتایج آزمایشگاهی و در محدوده‌ی کاری وسیعی از تغییرات پارامترهای مدل، روش‌های کنترل غیرخطی مد لغزشی و گام به گام به عقب<sup>۱</sup> تطبیقی بر اساس معیارهای کارایی مختلفی با هم مقایسه شده‌اند. معیارهای ارزیابی شامل خطای حالت ماندگار، پاسخ دینامیکی در لحظه‌ی راه‌اندازی، مقاومت<sup>۲</sup> کنترل کننده نسبت به تغییرات بار و منبع ورودی و همچنین سادگی پیاده‌سازی عملی است. برای استخراج نتایج آزمایشگاهی و پیاده‌سازی عملی روش‌های کنترلی از پردازنده‌ی سیگنال دیجیتال DSP-TMS320F2810<sup>۳</sup> ساخت شرکت تگزاس استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی ارائه شده نیز بر اساس نرم‌افزار MATLAB/Simulink به دست آمده‌اند.

کلمات کلیدی: مد لغزشی، انتخاب پارامتر، گام به گام به عقب تطبیقی، مقاوم، منبع تغذیه‌ی ایزوله‌ی فلای بک

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۲۴

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۱۹

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر مهدی سلیمی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران- اردبیل- میدان بسیج - دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اردبیل - دانشکده‌فنی-مهندسی، گروه مهندسی برق- الکترونیک

در مرجع [۱۰]، با استفاده از روش کنترل معادل، کنترل کننده‌ی مد لغزشی خاصی برای مبدل‌های DC به DC فلای‌بک طراحی شده است که در آن هدف تنظیم غیرمستقیم ولتاژ خروجی با کنترل جریان سلف مغناطیس‌کنندگی ترانسفورماتور فرکانس بالای مبدل است. کنترل کننده‌ی طراحی شده قادر است که در هر دو مد کاری پیوسته و ناپیوسته‌ی جریان سلف ولتاژ خروجی مبدل را تنظیم کند. با این حال، در روش کنترل مد لغزشی طرح شده در [۱۰] پارامترهای کنترلی سیستم با سعی و خطا انتخاب شده است و نمی‌توان در محدوده‌ی وسیعی از تغییرات نقطه‌ی کار، پایداری سیستم حلقه بسته را تضمین نمود. همچنین در [۱۰] اضافه کردن تابع علامت سطح لغزش برای بهبود مقاومت کنترل کننده در برابر نامعینی‌ها مطالعه نشده است.

در مقاله [۱۱]، با در نظر گرفتن وجود یک صفر سمت راستی در تابع تبدیل منبع تغذیه‌ی فلای‌بک و مشکلات استفاده از روش‌های کنترل سنتی، یک کنترل کننده‌ی مد لغزشی مرتبه‌ی دو برای تنظیم ولتاژ خروجی مبدل پیشنهاد شده است. پاسخ روش ارائه شده با در نظر گرفتن شبیه‌سازی‌های در نرم‌افزار MATLAB هنگام تغییرات بار و ولتاژ خط ورودی مطالعه شده است. با این حال، به دلیل عدم وجود عامل انتگرالی مناسبی در تعریف مرجع سیستم، کنترل کننده‌ی مد لغزشی طراحی شده دارای خطای ولتاژ هنگام تغییرات ولتاژ ورودی مدار است.

با در نظر گرفتن ماهیت غیرخطی مبدل فلای‌بک و همچنین مولد پیل سوختی به عنوان منبع ورودی، یک کنترل کننده‌ی مد لغزشی مرتبه‌ی بالا جهت تنظیم ولتاژ خروجی در [۱۲] ارائه شده است. نشان داده شده است که روش مد لغزشی ارائه شده پاسخ دینامیکی برتری در هنگام تغییرات بار نسبت به کنترل کننده‌ی خطی PI دارد. در کنترل کننده‌ی مد لغزشی تشریح شده، کلیدزنی مبدل بر اساس علامت سطح لغزش تعیین می‌شود و به همین دلیل نمی‌توان فرکانس کلیدزنی آنرا کاملاً تثبیت نمود. همچنین با در نظر گرفتن ماهیت فاز-غیرحذف مبدل، پایداری سیستم حلقه بسته در نقاط کاری مختلف اثبات نشده است. بر اساس جستجوی صورت گرفته، مقاله‌ی دیگری که از کنترل کننده‌ی مد لغزشی برای تنظیم ولتاژ خروجی منبع تغذیه فلای‌بک استفاده می‌کند، یافت نشد.

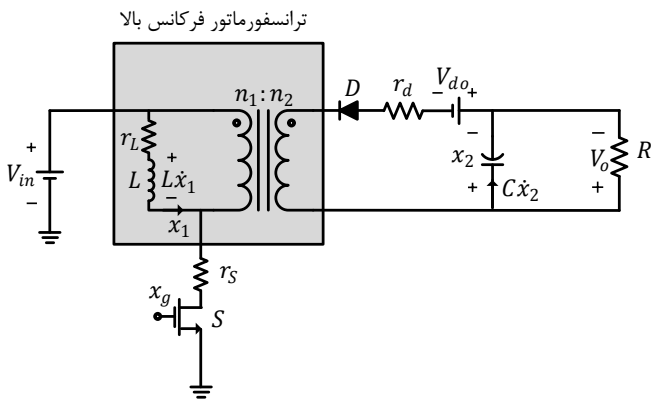
در این مقاله روشی جدید برای طراحی مرحله به مرحله‌ی کنترل کننده‌ی مقاوم مد لغزشی در منبع تغذیه‌ی ایزوله‌ی فلای‌بک ارائه شده است. مراحل طراحی شامل طراحی کنترل کننده‌ی معادل و انتخاب پارامترهای آن، تصحیح کنترل کننده‌ی حلقه بسته و اثبات پایداری سیستم است. در حقیقت، ابتدا کنترل کننده‌ی معادل مد لغزشی به ازای پارامترهای نامی مدل طرح می‌شود. به همین دلیل و با توجه به تغییرات پارامترها و نامعینی‌های مدل، می‌توان مولفه‌ی مقاوم سازی را بصورت ضربی از علامت سطح لغزش به کنترل کننده‌ی معادل افزود. در این حالت نشان داده شده است که با انتخاب مناسب پارامتر کنترلی سیستم، شرط پایداری کنترل کننده‌ی مد لغزشی در

با در نظر گرفتن امکان تغییرات پارامترهای مختلف مدل در برشگرهای<sup>۴</sup> الکترونیک قدرت در محدوده‌ی کاری نسبتاً وسیع، کنترل حلقه بسته‌ی آنها یکی از زمینه‌های فعال تحقیقاتی است. همچنین با توجه به حضور کلیدهای مختلف در ساختار این مبدل‌ها، مدل فضای حالت متوسط گیری شده‌ی مربوطه دارای ماهیت غیرخطی است. بدیهی است که با در نظر گرفتن این موضوع، استفاده از روش‌های کنترلی غیرخطی مختلف مانند کنترل مبتنی بر غیرفعال بودن [۱]، خطی سازی دقیق فیدبک [۲]، کنترل مد لغزشی [۳] و گام به گام به عقب تطبیقی [۴] برای تنظیم<sup>۵</sup> ولتاژ خروجی برشگرهای DC به DC می‌تواند پاسخ مقاوم تری در محدوده‌ی کاری وسیع ارائه دهد.

با در نظر گرفتن ماهیت ساختار متغیر<sup>۶</sup> مبدل‌های الکترونیک قدرت، اساساً استفاده از روش مد لغزشی در چنین کاربردهایی مناسب است. سادگی پیاده‌سازی و همچنین مقاومت ذاتی در برابر تغییرات پارامترهای مختلف باعث شده است که استفاده از کنترل کننده‌ی مقاوم اخیراً در مبدل‌های استاندارد مورد توجه جدی تر واقع شود [۵].

در حالت عمومی، طراحی کنترل کننده‌ی مد لغزشی با تعریف سطح لغزش شروع می‌شود. در کنترل مد لغزشی استاندارد، سطح لغزش بصورت ترکیبی خطی از خطاهای متغیرهای حالت سیستم قابل تعریف است. در این صورت، هدف کنترلی با قراردادن پاسخ سیستم بر روی سطح لغزشی و صفر شدن آن برآورده می‌شود. به‌طور خلاصه، در کنترل مد لغزشی مبدل‌های الکترونیک قدرت، سیگنال کلیدزنی طوری انتخاب می‌شود که سطح لغزشی تعریف شده صفر گردد. برای این کار می‌توان سیگنال کلیدزنی مبدل را در لحظات گذر از صفر سطح لغزشی عوض کرد تا پاسخ همیشه بر روی سطح باقی بماند. البته در عمل، با در نظر گرفتن محدودیت‌های سرعت کلیدزنی و برای جلوگیری از چتریگ<sup>۷</sup>، محدوده‌ای با پهنای قابل تنظیم در حوالی سطح لغزش به منظور تعیین فرمان کلیدزنی تعریف می‌شود [۶]-[۷]. با این حال، مهمترین اشکال چنین روشی تغییرات فرکانس کلیدزنی مبدل است. برای حل این مشکل در کنترل مد لغزشی، روش کنترل معادل پیشنهاد شده است [۸]-[۹]. در چنین روشی، کنترل کننده با صفر گرفتن مشتق سطح لغزش طراحی می‌شود. با توجه به اینکه کنترل کننده‌ی معادل طراحی شده با استفاده از یک واحد PWM به مبدل اعمال می‌شود، به همین دلیل فرکانس کلیدزنی سیستم در نواحی کاری مختلف کاملاً ثابت خواهد بود. با این حال، اغلب در روش مد لغزشی معادل، پارامترهای کنترل کننده بر اساس سعی و خطا انتخاب می‌شوند. از طرفی دیگر با در نظر گرفتن پیچیدگی‌های مدل و همچنین پیاده‌سازی عملی در منابع تغذیه‌ی ایزوله مانند مبدل فلای‌بک، استفاده از روش‌های کنترل غیرخطی محدود به مبدل‌های DC به DC استاندارد غیر ایزوله بوده است و گزارش‌های نسبتاً محدودی در این زمینه وجود دارد.

موردنظر در شکل ۱ آورده شده است. شایان ذکر است که سلف نشان داده شده در ساختار مبدل ( $L$ ) مربوط به امپدانس مغناطیس کنندگی ترانسفورماتور فرکانس بالا است.



شکل (۱): مدار قدرت منبع تغذیه‌ی فلای بک با در نظر گرفتن امان‌های پارازیتی

با در نظر گرفتن چرخه‌ی کار سیگنال کلیدزنی  $D \triangleq \frac{t_{on}}{T_s}$  می‌توان در حالت کلی و به ازای شرایط کلیدزنی مختلف، با توجه به بردار حالت  $\mathbf{X}^T = (x_1, x_2)$  معادلات فضای حالت مبدل را بصورت زیر استخراج نمود. در این حالت  $t_{on}$  مدت زمان روشن شدن کلید قدرت  $S$  و  $T_s$  دوره‌ی تناوب کلیدزنی است. ترانسفورماتور فرکانس بالای موجود در ساختار مبدل جهت ایزولاسیون بار و منبع ورودی استفاده می‌شود. به همین دلیل می‌توان بدون تغییر در کلیت موضوع نسبت تبدیل آن را واحد فرض کرد. به همین دلیل در ادامه‌ی بحث فرض می‌شود که  $\frac{n_2}{n_1} = 1$  است.

در فاصله‌ی زمانی  $0 \leq t \leq DT_s$ ، کلید  $S$  روشن فرض می‌شود. در این فاصله زمانی دیود خاموش است و انرژی مورد نیاز بار توسط خازن تأمین می‌شود. در این حالت مدل فضای حالت مبدل بصورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{(r_s + r_L)}{L}x_1 + \frac{V_{in}}{L} \\ \dot{x}_2 = -\frac{1}{RC}x_2 \end{cases} \quad (1)$$

در فاصله‌ی زمانی  $DT_s \leq t \leq (1 - \Delta)T_s$ ، فرض می‌شود که کلید  $S$  خاموش، دیود روشن و  $x_1 > 0$  است، در این حالت:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{(r_L + r_d)}{L}x_1 - \frac{1}{L}x_2 - \frac{V_{do}}{L} \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{C}x_1 - \frac{1}{RC}x_2 \end{cases} \quad (2)$$

و در محدوده‌ی ناپیوستگی جریان سلف و در فاصله‌ی زمانی  $(1 - \Delta)T_s \leq t \leq T_s$  (که کلید  $S$  دیود خاموش هستند و  $x_1 = 0$  است):

کل محدوده‌ی کاری سیستم برقرار است. همچنین با در نظر گرفتن نتایج آزمایشگاهی مختلف، پاسخ دینامیکی این روش با کنترل کننده‌ی گام به گام به عقب تطبیقی مقایسه می‌شود. به همین دلیل، چگونگی طراحی کنترل کننده‌ی تطبیقی مربوطه در مبدل مورد مطالعه نیز به اختصار آورده شده است.

یکی از تفاوت‌های اساسی روش ارائه شده در این مقاله نسبت به سایر مقالات، چگونگی تعیین ضرایب و بهره‌های کنترلی به منظور اطمینان از پایداری کنترل کننده‌ی حلقه بسته است. در حقیقت با توجه به پیچیدگی‌های موجود در طرح روش‌های کنترل غیرخطی [۱۳]-[۱۴] اغلب تلاش می‌شود که با سعی و خطا بهره‌های کنترلی انتخاب شوند. بدیهی است که در چنین حالتی امکان تعیین محدوده‌ی دقیق و بهینه‌ی ضرایب مربوطه مقدور نمی‌باشد و اساساً ممکن است با تغییرات وسیع نقطه‌ی کار، سیستم حلقه بسته ناپایدار شود. برای حل این مشکلات، در این مقاله روشی کاملاً منظم و سیستماتیک برای تعیین ضرایب کنترل کننده‌ی مد لغزشی ارائه شده است.

بطور خلاصه می‌توان مهمترین ویژگی‌های روش کنترلی غیرخطی مد لغزشی ارائه شده در این مقاله را به شرح زیر بیان نمود:

- ۱- تعیین بهینه‌ی پارامترهای کنترلی بصورت سیستماتیک جهت اطمینان از پایداری سیستم
- ۲- امکان رگولاسیون ولتاژ خروجی در محدوده‌ی کاری وسیع در هر دو مد کاری پیوسته و ناپیوسته‌ی جریان سلف
- ۳- امکان رگولاسیون ولتاژ خروجی به ازای مقادیر مرجع متفاوت
- ۴- توسعه‌ی کنترل کننده‌ی مد لغزشی با فرکانس کلیدزنی ثابت و خطای حالت ماندگار صفر

مقایسه نتایج عملی روش‌های کنترلی غیرخطی مد لغزشی و گام به گام به عقب تطبیقی در شرایط کاری کاملاً یکسان، نشان می‌دهد که:

الف- کنترل کننده‌ی مد لغزشی پاسخ مقاوم‌تری نسبت به تغییرات بار دارد.

ب- فراجهدش پاسخ ولتاژ خروجی و جریان سلف در لحظه‌ی راه‌اندازی و تغییرات خروجی در روش مد لغزشی بیش از تطبیقی است.

ج- هر دو کنترل کننده نسبت به تغییرات ولتاژ ورودی پاسخ دینامیکی تقریباً یکسانی دارند.

د- با توجه به نحوه‌ی تعریف مقادیر مرجع، خطای حالت ماندگار در هر دو روش صفر است.

ه- از نظر چگونگی پیاده‌سازی عملی، کنترل کننده‌ی مد لغزشی ساده‌تر از روش غیرخطی مبتنی بر تابع لیاپانوف است.

## ۲- مدل فضای حالت متوسط گیری شده‌ی منبع تغذیه‌ی فلای بک

با در نظر گرفتن مقاومت حالت روشن کلید کنترل شده ( $r_s$ ) و دیود قدرت ( $r_d$ ) و مقاومت‌های سری معادل سلف ( $r_L$ )، مدار قدرت مبدل

$$+ \begin{bmatrix} \frac{\tilde{u}(r_d - r_s)}{L} & \frac{1}{L}(\tilde{u}) \\ \frac{1}{C}(-\tilde{u}) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\tilde{u}(V_{in} + V_{do})}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

با جداسازی مولفه‌های مختلف DC و ac در طرفین رابطه‌ی (۶) و همچنین صرف نظر کردن از حاصلضرب‌های مولفه‌های سیگنال کوچک (تقریب سیگنال کوچک)، می‌توان مدل فضای حالت خطی-ساز شده‌ی مبدل را به دست آورد. با تفکیک مؤلفه‌های DC و همچنین صفر گرفتن مشتق آن‌ها، رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{(r_L + r_d) - U(r_d - r_s)}{L} & -\frac{1}{L}(1 - U) \\ \frac{1}{C}(1 - U) & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{U(V_{in} + V_{do}) - V_{do}}{L} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

همچنین با تفکیک مؤلفه‌های ac و با در نظر گرفتن تقریب سیگنال کوچک رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}}_1 \\ \dot{\tilde{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{(r_L + r_d) - U(r_d - r_s)}{L} & -\frac{1}{L}(1 - U) \\ \frac{1}{C}(1 - U) & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\tilde{u}(r_d - r_s)}{L} & \frac{1}{L}(\tilde{u}) \\ -\frac{1}{C}(\tilde{u}) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\tilde{u}(V_{in} + V_{do})}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

با اعمال تبدیل لاپلاس، می‌توان رابطه‌ی (۸) را به شکل زیر بازنویسی کرد که در آن  $\tilde{U} = L(\tilde{u})$ ،  $\tilde{X}_1 = L(\tilde{x}_1)$  و  $\tilde{X}_2 = L(\tilde{x}_2)$  فرض شده است:

$$\begin{bmatrix} \tilde{X}_1 \\ \tilde{X}_2 \end{bmatrix} = \left[ SI - \begin{bmatrix} -\frac{(r_L + r_d) - U(r_d - r_s)}{L} & -\frac{1}{L}(1 - U) \\ \frac{1}{C}(1 - U) & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \right]^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} \frac{\tilde{U}(r_d - r_s)}{L} & \frac{1}{L}(\tilde{U}) \\ -\frac{1}{C}(\tilde{U}) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{X}_1 \\ \tilde{X}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{U}(V_{in} + V_{do}) \\ 0 \end{bmatrix} \right\} \quad (9)$$

با تعریف توابع تبدیل کنترلی سیستم به شکل  $H_1(s) = \frac{\tilde{X}_1(s)}{\tilde{U}(s)}$ ،  $H_2(s) = \frac{\tilde{X}_2(s)}{\tilde{U}(s)}$  می‌توان روابط زیر را به دست آورد. در این روابط عملگر لاپلاس است.

$$H_1(s) = \frac{\tilde{X}_1(s)}{\tilde{U}(s)} = \frac{(V_{in} + V_{do})(R - sLU/(1 - U)^2)}{[As^2 + Bs + C]} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = 0 \\ \dot{x}_2 = -\frac{1}{RC}x_2 \end{cases} \quad (3)$$

با در نظر گرفتن مقدار متوسط معادلات فضای حالت در کل دوره‌ی تناوب کلیدزنی  $(0 \leq t \leq T_S)$ ، به سادگی می‌توان مدل فضای حالت متوسط گیری شده‌ی مبدل را بصورت زیر استخراج نمود [۱۵]. برای اینکار کافی است سمت راست مجموعه معادلات (۱) و (۲) و (۳) را به ترتیب در  $D$ ،  $(1 - D - \Delta)$  و  $\Delta$  ضرب کرده و هر سه معادله را با هم جمع کنیم:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{(r_L + r_d)(1 - \Delta) - D(r_d - r_s)}{L}x_1 \\ -\frac{1}{L}(1 - D - \Delta)x_2 + \frac{D(V_{in} + V_{do}) - V_{do}(1 - \Delta)}{L} \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{C}(1 - D - \Delta)x_1 - \frac{1}{RC}x_2 \end{cases} \quad (4)$$

در این مجموعه معادلات،  $\Delta$  نشان دهنده‌ی ضریبی از دوره‌ی تناوب کلیدزنی است که در آن، هم کلید قدرت و هم دیود مربوطه هر دو خاموش می‌شوند. بدیهی است که با فرض  $\Delta = 0$  می‌توان به سادگی مدل فضای حالت متوسط گیری شده‌ی مبدل در مد کاری پیوسته‌ی جریان سلف را به شکل زیر استخراج نمود:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{(r_L + r_d) - D(r_d - r_s)}{L}x_1 \\ -\frac{1}{L}(1 - D)x_2 + \frac{D(V_{in} + V_{do}) - V_{do}}{L} \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{C}(1 - D)x_1 - \frac{1}{RC}x_2 \end{cases} \quad (5)$$

## ۲-۱- توابع تبدیل مبدل

به منظور استخراج توابع تبدیل سیگنال کوچک مبدل در حول یک نقطه‌ی کار دلخواه، می‌توان روابط،  $x_1 = X_1 + \tilde{x}_1$ ،  $x_2 = X_2 + \tilde{x}_2$  و  $D = U + \tilde{u}$  را در معادله‌ی (۵) قرار داد. در این روابط پارامترهای DC مربوط به نقطه‌ی کار مبدل و پارامترهای دارای علامت ~ مربوط به اغتشاشات سیگنال کوچک در حول نقطه‌ی کار هستند.

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 + \dot{\tilde{x}}_1 \\ \dot{X}_2 + \dot{\tilde{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{(r_L + r_d) - U(r_d - r_s)}{L} & -\frac{1}{L}(1 - U) \\ \frac{1}{C}(1 - U) & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{U(V_{in} + V_{do}) - V_{do}}{L} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{(r_L + r_d) - U(r_d - r_s)}{L} & -\frac{1}{L}(1 - U) \\ \frac{1}{C}(1 - U) & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\tilde{u}(r_d - r_s)}{L} & \frac{1}{L}(\tilde{u}) \\ -\frac{1}{C}(\tilde{u}) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{u}(V_{in} + V_{do}) \\ 0 \end{bmatrix}$$

جدول (۱): پارامترهای نامی منبع تغذیه‌ی ایزوله‌ی فلای بک

پارامتر	سمبل	مقدار
ولتاژ ورودی	$V_{in}$	۱۲ ولت
سلف مغناطیس- کنندگی	$L$	۵۵۰ میکرو هانری
خازن خروجی	$C$	۳۳۰ میکروفاراد
مقاومت بار	$R$	۸/۵ اهم
نسبت تبدیل ترانس	$\frac{n_2}{n_1}$	۱ (واحد)

$$H_2(s) = \frac{\tilde{X}_2(s)}{\tilde{U}(s)} = \frac{(V_{in} + V_{do})(1 + U + sRC/(1 - U))}{[As^2 + Bs + C]} \quad (11)$$

که در روابط بالا  $A = \frac{LC}{(1-U)^2}$ ،  $B = \frac{[L+RC(r_L+r_d)-U(r_d-r_S)]}{R(1-U)^2}$  و  $C = \frac{(r_L+r_d)-U(r_d-r_S)}{R(1-U)^2} + 1$  می‌باشد.

در این ارتباط، توجه به سه نکته‌ی زیرداری اهمیت است:

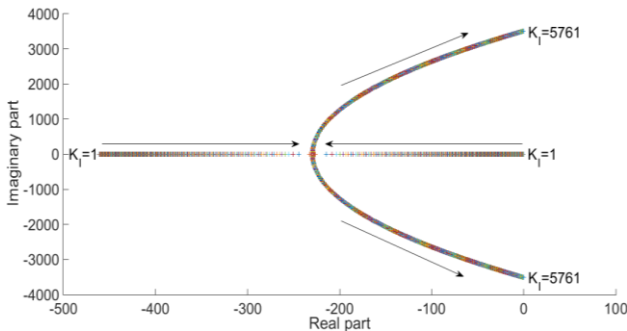
۱- تابع تبدیل ولتاژ خروجی به چرخه‌ی کار مبدل ( $H_1$ ) دارای یک صفر سمت راستی است. به همین دلیل می‌توان نتیجه گرفت که منبع تغذیه‌ی فلای بک با در نظر گرفتن ولتاژ خازن به عنوان خروجی کنترلی دارای ماهیت غیرحداقل‌افزاینده است. در نتیجه کنترل مستقیم ولتاژ خروجی در این برشگر در محدوده‌ی کاری وسیع با مشکلاتی همراه است. برای حل این مشکل، می‌توان کنترل‌کننده‌ی حلقه بسته را به منظور کنترل جریان سلف مبدل ( $x_1$ ) طرح نمود. بدیهی است که تنظیم ولتاژ خروجی در این حالت توسط حلقه‌ی کنترلی دیگری صورت می‌پذیرد [۱۶].

۲- اگرچه طراحی کنترل‌کننده برای تنظیم جریان سلف مبدل براساس رابطه‌ی (۱۰) با استفاده از روش‌های خطی نسبتاً سراسر است، با این حال واضح است که در صورت تغییرات وسیع پارامترهای مبدل نسبت به نقطه‌ی کار، توابع تبدیل به دست آمده براساس تقریب سیگنال کوچک متعبر نخواهند بود. به همین دلیل نمی‌توان پایداری روش‌های کنترلی خطی را در محدوده‌ی کاری نسبتاً وسیع تضمین نمود. برای رفع این مشکلات استفاده از روش‌های کنترلی غیرخطی در مبدل‌های الکترونیک قدرت کاملاً مرسوم است.

۳- اگرچه در استخراج مدل مبدل در روابط (۴) و (۵) تأثیر المان‌های پارازیتی مختلف لحاظ شده است، با این حال در مرجع [۱۷] نشان داده شده است که در طراحی کنترل‌کننده‌های غیرخطی و بررسی پایداری آنها، به دلیل وجود فیدبک مستقیم از کلیه‌ی متغیرهای حالت و اندازه‌گیری آنلاین آنها می‌توان از المان‌های پارازیتی صرف نظر کرد. واضح است که به دلیل مقاوم بودن کنترل‌کننده‌های غیرخطی مورد مطالعه نسبت به نامعینی‌های مدل می‌توان برای تسهیل طراحی، المان‌های پارازیتی مبدل را صفر در نظر گرفت. در این صورت معادله (۴) بصورت زیر ساده خواهد شد:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{1}{L}(1-D)x_2 + \frac{\Delta}{L}x_2 + \frac{V_{in}D}{L} \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{C}(1-D)x_1 - \frac{\Delta}{C}x_1 - \frac{1}{RC}x_2 \end{cases} \quad (12)$$

به همین دلیل در این مقاله به منظور طراحی و مقایسه‌ی روش‌های مختلف کنترل غیرخطی از مدل ساده شده‌ی (۱۲) استفاده می‌شود. این مدل، رفتار دینامیک منبع تغذیه‌ی ایزوله‌ی فلای بک را در هر دو مد کاری پیوسته ( $\Delta = 0$ ) و ناپیوسته ( $\Delta \neq 0$ ) جریان سلف نشان می‌دهد. واضح است که مدل منبع تغذیه در مد کاری پیوسته به صورت زیر خواهد شد:



شکل (۲): چگونگی تغییرات ریشه‌های معادله‌ی مشخصه به ازای

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{1}{L}(1-D)x_2 + \frac{V_{in}D}{L} \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{C}(1-D)x_1 - \frac{1}{RC}x_2 \end{cases} \quad (13)$$

### ۳- طراحی کنترل‌کننده‌ی مد لغزشی

روش کنترل مقاوم مد لغزشی توسط یوتکین<sup>۹</sup> برای سیستم‌های ساختار متغیر ارائه گردید. با توجه به گسترش کاربرد مبدل‌های مختلف الکترونیک قدرت و همچنین ساختار متغیر آنها به دلیل کلیدزنی، کنترل مد لغزشی برشگرهای مختلف در سال اخیر مورد توجه جدی قرار گرفته است [۱۸]-[۲۰].

طراحی این روش کنترلی با تعریف سطح لغزش شروع می‌شود. سطح لغزش معمولاً بصورت خطای خروجی سیستم تعریف می‌شود. البته می‌توان با افزودن انتگرال و مشتق خطای سیستم به سطح لغزش [۲۱] پاسخ دینامیکی و حالت ماندگار کنترل‌کننده را بهبود داد. همچنین هدف نهایی از طرح کنترل‌کننده‌ی مد لغزشی صفر نمودن سطح لغزش تعریف شده است. پس از قرار گرفتن پاسخ بر روی سطح، سیستم وارد مد لغزشی می‌شود. در این حالت با کلیدزنی مناسب پاسخ در روی سطح لغزشی حرکت می‌کند تا به حالت ماندگار برسد. در ادامه، چگونگی طراحی کنترل‌کننده‌ی مد لغزشی فرکانس ثابت در منابع تغذیه‌ی فلای بک آورده می‌شود.

### ۳-۱- گام اول) طراحی کنترل کننده معادل در شرایط

#### نامی

ابتدا با در نظر گرفتن ماهیت غیرحداقل فزاینده و تعریف جریان سلف به عنوان خروجی اولیه‌ی کنترل کننده، سطح لغزش سیستم بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$S = I_{L(ref)} - x_1 \quad (14)$$

در این رابطه  $I_{L(ref)}$  مقدار مرجع جریان سلف است. با توجه به اینکه خروجی اصلی سیستم، ولتاژ خازن مبدل است، به منظور وارد نمودن  $x_2$  در معادلات کنترلی، جریان مرجع سلف بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$I_{L(ref)} = K_I \int (V_{ref} - x_2) dt \quad (15)$$

که در این روابط  $V_{ref}$  مرجع ولتاژ خروجی مبدل است. استفاده از عامل انتگرالی در این رابطه صفر شدن خطای پاسخ سیستم را تضمین می‌کند.

بدیهی است که هدف اصلی کنترل کننده صفر نمودن سطح لغزش است. در چنین حالتی می‌توان مشتق زمانی سطح لغزش را هم صفر فرض کرده و کنترل کننده‌ی معادل را استخراج نمود.

$$\dot{S} = 0 \rightarrow \dot{I}_{L(ref)} - \dot{x}_1 = 0 \quad (16)$$

با جایگذاری معادلات (۱۳) و (۱۵) در معادله‌ی (۱۶)، می‌توان کنترل کننده‌ی مد لغزشی معادل را به صورت زیر استخراج نمود:

$$D_{eq} = \frac{LK_I(V_{ref} - x_2) + x_2}{x_2 + V_{in}} \quad (17)$$

در شرایط ماندگار، با صفر شدن متغیرهای خطا در معادله‌ی (۱۷) رابطه‌ی زیر به دست می‌آید که در بحث منبع تغذیه‌ی ایزوله‌ی فلای- بک با نسبت تبدیل واحد کاملاً شناخته شده است:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{D_{eq}}{1 - D_{eq}} \quad (18)$$

همچنین با صفر گرفتن مشتق معادلات حالت مبدل در حالت ماندگار در (۱۳) و حذف  $D$ ، می‌توان به سادگی نشان داد که:

$$I_L = \left(1 + \frac{V_o}{V_{in}}\right) \left(\frac{V_o}{R}\right) \quad (19)$$

### ۳-۲- گام دوم) انتخاب پارامتر کنترلی ( $K_I$ )

در این بخش چگونگی انتخاب بهره کنترلی  $K_I$  مطالعه می‌شود. با قرار دادن کنترل کننده‌ی (۱۷) در معادلات حالت (۱۳)، روابط زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= K_I(V_{ref} - x_2) \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{C}x_1 - \frac{1}{RC}x_2 \\ &\left( -\frac{x_1}{C(x_2 + V_{in})} [LK_I(V_{ref} - x_2) + x_2] \right) \end{aligned} \quad (20)$$

می‌توان نشان داد که نقطه‌ی کار مبدل در حالت ماندگار با صفر گرفتن مجموعه معادلات (۲۰) به صورت  $(X_{1S}, X_{2S}) = (I_{L(ref)}, V_{ref})$  به دست می‌آید که در آن  $I_{L(ref)} = \frac{V_{ref}}{R} \left(1 + \frac{V_{ref}}{V_{in}}\right)$  بوده و معادله‌ی (۱۹) تأیید می‌شود.

با فرض تغییرات سیگنال کوچک متغیرهای حالت  $(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2)$  در حول نقطه‌ی کار، می‌توان بر اساس روش خطی‌سازی ژاکوبین، یک سیستم غیرخطی دلخواه را به شکل زیر خطی‌سازی نمود. فرض کنید که مدل یک سیستم غیرخطی دلخواه به صورت زیر باشد:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2) \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) \end{cases} \quad (21)$$

در این صورت با فرض  $x_1 = X_{1S} + \tilde{x}_1$  و  $x_2 = X_{2S} + \tilde{x}_2$  می‌توان مدل خطی‌سازی شده مربوط به معادلات (۲۱) را به شکل زیر نوشت:

$$(\dot{\tilde{x}}_1, \dot{\tilde{x}}_2)^T = J(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2)^T \quad (22)$$

که در این معادله  $J$  یک ماتریس مربعی  $2 \times 2$  بوده و اصطلاحاً ماتریس ژاکوبین نامیده می‌شود. درایه‌های مختلف ماتریس ژاکوبین را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$a_{ij} = \left. \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \right|_{\text{نقطه کار}} \quad (i, j = 1, 2) \quad (23)$$

بر اساس کنترل کننده‌ی طراحی شده، می‌توان آرایه‌های مختلف ماتریس ژاکوبین سیستم را با در نظر گرفتن معادلات (۲۰) به صورت زیر محاسبه نمود:

$$\begin{aligned} a_{11} &= 0 \\ a_{12} &= -K_I \\ a_{21} &= \frac{1}{C} - \frac{V_{ref}}{C(V_{ref} + V_{in})} \\ a_{22} &= -\frac{1}{RC} + \frac{I_{L(ref)}(LK_I - 1)}{C(V_{ref} + V_{in})} + \frac{I_{L(ref)}V_{ref}}{C(V_{ref} + V_{in})^2} \end{aligned} \quad (24)$$

مقادیر نامی فرض شده برای پارامترهای مبدل مورد نظر در جدول آورده شده است.

با فرض  $V_{ref} = 5V$ ، می‌توان به سادگی جریان مرجع مبدل در نقطه‌ی کار را از رابطه‌ی (۱۹) به صورت  $I_{L(ref)} = 0.834$  محاسبه کرد. با در نظر گرفتن مجموعه معادلات ارائه شده، ماتریس ژاکوبین مبدل به صورت زیر به دست می‌آید:

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -K_I \\ 2140 & 0.08K_I - 460.9 \end{bmatrix} \quad (25)$$

معادله مشخصه‌ی سیستم مورد نظر به ازای کنترل‌کننده‌ی طراحی شده از رابطه‌ی  $|s - J| = 0$  به صورت زیر محاسبه می‌شود که در آن  $s$  عملگر لاپلاس است.

$$s^2 + (460.9 - 0.08K_I)s + 2140K_I = 0 \quad (26)$$

بدیهی است که برای اطمینان از پایداری سیستم باید ریشه‌های معادله‌ی (26) در نیم صفحه‌ی سمت چپ واقع شوند. چگونگی تغییرات ریشه‌های معادله‌ی مشخصه‌ی سیستم به ازای مقادیر مختلف بهره‌ی کنترلی در شکل ۲ آورده شده است. ملاحظه می‌شود محدوده‌ی پایدار کنترل‌کننده‌ی طراحی شده به ازای  $0 \leq K_I \leq 5761$  به دست می‌آید.

### ۳-۳- گام سوم) تصحیح کنترل‌کننده‌ی مد لغزشی طراحی شده و اثبات پایداری آن

رابطه‌ی استخراج شده برای کنترل‌کننده‌ی مد لغزشی در (17) به ازای پارامترهای نامی مدل می‌باشد. با توجه به تغییرات پارامترها و نامعینی‌های مدل، می‌توان مولفه‌ی مقاوم سازی را بصورت  $sgn(S)$  که کنترل‌کننده‌ی معادل افزود. در این حالت کنترل‌کننده‌ی نهایی به صورت زیر خواهد بود:

$$D = D_{eq} + K \operatorname{sgn}(S) \\ = \frac{LK_I(V_{ref} - x_2) + x_2}{x_2 + V_{in}} + K \operatorname{sgn}(S) \quad (27)$$

با در نظر گرفتن معادلات (13) و (16)، می‌توان مشتق سطح لغزش را بصورت زیر بازنویسی کرد:

$$\dot{S} = K_I(V_{ref} - x_2) + \frac{1}{L}(1 - D)x_2 - \frac{V_{in}}{L}D \quad (28)$$

برای محاسبه‌ی محدوده‌ی  $K$ ، شرط پایداری کنترل‌کننده‌ی مد لغزشی ( $\dot{S} \leq -\eta|S|$ ) را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$S \times \left[ -K \operatorname{sgn}(S) \frac{(x_2 + V_{in})}{L} \right] \leq -\eta|S| \quad (29)$$

بدیهی است که  $\operatorname{sgn}(S) = \frac{|S|}{S}$  است و با در نظر گرفتن این رابطه، معادله (29) به صورت زیر ساده می‌شود:

$$-K|S| \frac{(x_2 + V_{in})}{L} \leq -\eta|S| \quad (30)$$

با ساده سازی  $|S|$  از طرفین رابطه‌ی (30)، محدوده‌ی  $K$  به صورت زیر بدست می‌آید:

$$K \geq \frac{\eta L}{(x_2 + V_{in})}, \quad \eta > 0 \quad (31)$$

که در این روابط  $\eta$  یک پارامتر دلخواه کنترلی مثبت است. بطور خلاصه، با انتخاب  $K$  از معادله‌ی (31) پایداری کنترل‌کننده‌ی طراحی

شده در محدوده‌ی کاری وسیعی از تغییرات نقطه‌ی کار و همچنین نامعینی‌های مدل تضمین خواهد شد. با فرض مقدار ده برای  $\eta$ ، ملاحظه می‌شود که در صورت انتخاب  $K = 1$ ، در شرایط کاری مختلف نامعادله‌ی ارائه شده در معادله (31) برقرار است.

### ۴- طراحی کنترل‌کننده‌ی گام به گام به عقب تطبیقی مبتنی بر تابع لیاپانوف

چگونگی پاسخ کنترل‌کننده‌های مختلف نسبت به نامعینی‌های مدل در محدوده‌ی کاری وسیع یکی از چالش‌های اساسی در مبدل‌های الکترونیک قدرت است. اغلب در روش‌های کنترل سنتی باید با تغییرات نقطه‌ی کار سیستم، ضرایب کنترلی مجدداً تنظیم شوند [22] تا پایداری سیستم تنظیم گردد. بدیهی است که چنین روشی اصلاً سراسر نبوده و با پیچیدگی‌های متعددی همراه خواهد بود. یکی از روش‌های کارآمد برای پایداری سیستم کنترلی در محدوده‌ی کاری وسیع استفاده از کنترل تطبیقی است که در آن تغییرات پارامترهای مدل با تعریف قوانین تطبیق مناسبی تخمین زده می‌شوند. با توجه به مدل مبدل مورد مطالعه در این مقاله، مقاومت بار، ولتاژ ورودی سیستم و پارامتر  $\Delta$  نامعین فرض می‌شوند. همچنین با توجه به ماهیت غیرخطی مبدل از طراحی مبتنی بر تابع لیاپانوف در توسعه‌ی کنترل‌کننده غیر خطی تطبیقی استفاده می‌شود تا پایداری سیستم در محدوده کاری وسیع تضمین شود.

#### ۴-۱- گام اول) تعریف خطای جریان سلف

با در نظر گرفتن رابطه‌ی (12) خطای جریان سلف مبدل را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$y_1 = x_1 - I_{L(ref)} \rightarrow \dot{y}_1 = \dot{x}_1 - \dot{I}_{L(ref)} \\ = \beta_1(1 - D)x_2 + \beta_2 x_2 + \beta_3 D - \dot{I}_{L(ref)} \quad (32)$$

که در رابطه‌ی فوق  $\beta_1 = -\frac{1}{L}$ ،  $\beta_2 = \frac{\Delta}{L}$ ،  $\beta_3 = \frac{V_{in}}{L}$  و  $I_L$  جریان مرجع سلف می‌باشد.

با توجه به نامعینی پارامترهای مبدل، مقدار تخمینی آن‌ها بصورت  $\hat{\beta}_i$  ( $i = 1$  to 3) تعریف می‌شود. فرم ماتریسی رابطه‌ی (32) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

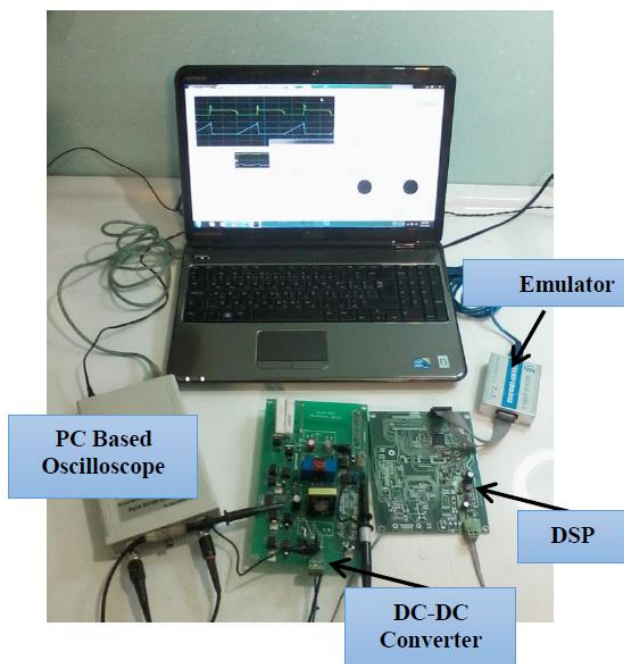
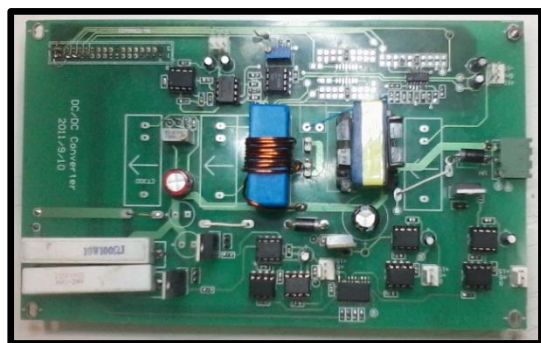
$$\dot{y}_1 = \hat{\beta}^T w_1 - \dot{I}_{L(ref)} + (\beta - \hat{\beta})^T w_1 \quad (33)$$

که:

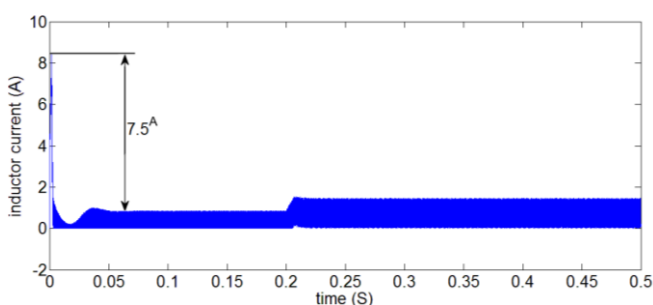
$$\hat{\beta}^T = [\hat{\beta}_1 \hat{\beta}_2 \hat{\beta}_3], \quad w_1^T = [(1 - D)x_2 \quad x_2 \quad D] \quad (34)$$

حال می‌توان تابع لیاپانوفی را به شکل زیر تعریف کرد:

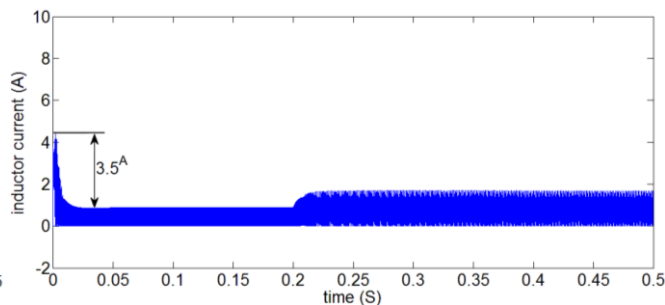
$$V_1 = 0.5y_1^2 + (\beta - \hat{\beta})^T \Gamma^{-1} (\beta - \hat{\beta}) \quad (35)$$



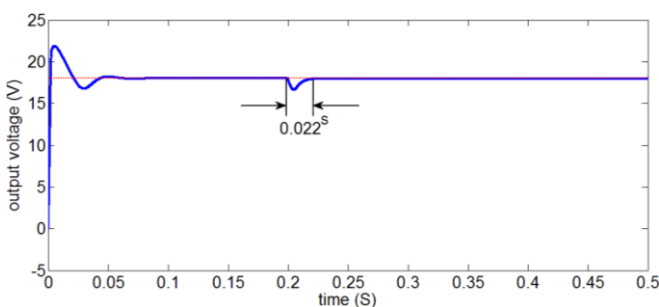
شکل (۳): مجموعه آزمایشگاهی استفاده شده



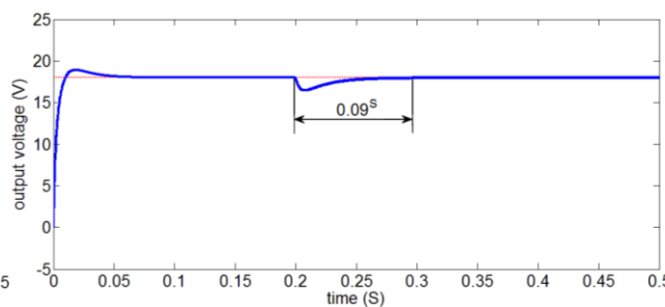
(ب) جریان سلف در کنترل کننده مد لغزشی



(الف) جریان سلف در کنترل کننده تطبیقی



(ج) ولتاژ خروجی در کنترل کننده تطبیقی (د) ولتاژ خروجی در کنترل کننده مد لغزشی



شکل (۴): پاسخ کنترل کننده‌های مورد مطالعه نسبت به تغییرات مقاومت بار از لحظه‌ی راه‌اندازی (فرض شده است که مقاومت بار در لحظه‌ی  $t$

با در نظر گرفتن رابطه‌ی (۳۵)، واضح است که مشتق زمانی تابع لیاپانوف به صورت زیر می‌شود:

$$\dot{V}_1 = y_1 \dot{y}_1 + (\beta - \hat{\beta})^T \Gamma^{-1} (-\dot{\hat{\beta}}) \quad (36)$$

که در رابطه فوق  $\Gamma$  یک ماتریس قطری معین مثبت است و آرایه‌های آن  $\gamma_{ii} (i = 1 \text{ to } 3)$  بهره‌های تطابق نامیده می‌شود.



با قرار دادن رابطه‌ی (۳۳) در (۳۶) می‌توان مشتق تابع لیاپانوف را به شکل زیر ساده‌سازی نمود:

$$\dot{V}_1 = y_1(\hat{\beta}^T w_1 - \dot{I}_L(\text{ref})) + (\beta - \hat{\beta})^T \Gamma^{-1}(-\hat{\beta} + \Gamma y_1 w_1) \quad (37)$$

با فرض اینکه  $-h_1 y_1(\hat{\beta}^T w_1 - \dot{I}_L) = 0$  و  $(\beta - \hat{\beta})^T \Gamma^{-1}(-\hat{\beta} + \Gamma y_1 w_1) = 0$  باشد، رابطه‌ی (۳۷) به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\dot{V}_1 = -h_1 y_1^2 \leq 0 \quad (38)$$

که پارامتر  $h_1$  مقدار مثبت دلخواهی است. منفی بودن مشتق زمانی تابع لیاپانوف پایداری سیستم تا این مرحله را تضمین می‌کند.

#### ۴-۲- گام دوم) تعریف دومین متغیر خطا

از آنجایی که  $-h_1 y_1$  و  $\hat{\beta}^T w_1 - \dot{I}_L$  لزوماً با هم برابر نیستند، خطای متغیر  $y_2$  به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$y_2 = \hat{\beta}^T w_1 - \dot{I}_L(\text{ref}) + h_1 y_1 \quad (39)$$

با در نظر گرفتن روش مشابهی با معادلات آورده شده در گام قبلی می‌توان کنترل جریان غیرخطی تطبیقی ( $D$ ) و قوانین تخمین  $(\hat{\beta}_i, i = 1 \text{ to } 3)$  مبدل را بصورت زیر نوشت:

$$\dot{D} = \frac{-1}{-\hat{\beta}_1 x_2 + \hat{\beta}_3} [h_2 y_2 + \hat{\beta}_1 h_1 (1-D)x_2 + \hat{\beta}_2 h_1 x_2 + \hat{\beta}_3 h_1 (D) + \hat{\beta}_1 (1-D)x_2 + \hat{\beta}_2 x_2 + \hat{\beta}_3 D - h_1 \dot{I}_L(\text{ref}) - \dot{I}_L(\text{ref})] \quad (40)$$

$$\dot{\hat{\beta}}_1 = \gamma_{11} x_2 (1-D) [y_1 + h_1 y_2] \quad (41)$$

$$\dot{\hat{\beta}}_2 = \gamma_{22} D [y_1 + h_1 y_2] \quad (42)$$

$$\dot{\hat{\beta}}_3 = \gamma_{33} x_2 [y_1 + h_1 y_2] \quad (43)$$

#### ۵- مقایسه‌ی روش‌های کنترلی طراحی شده بر اساس نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی

معیارهای ارزیابی روش‌های کنترلی شامل خطای حالت ماندگار، پاسخ دینامیکی در لحظه‌ی راه‌اندازی و همچنین پاسخ کنترل‌کننده نسبت به اغتشاشات ناشی از تغییرات بار و منبع ورودی است.

به منظور ارزیابی چگونگی پاسخ کنترل‌کننده‌ی مدلفزشی طراحی شده در معادله‌ی (۴۲) و کنترل‌کننده تطبیقی در معادلات (۴۰)-(۴۳) با در نظر گرفتن مقادیر نامی پارامترهای منبع تغذیه در جدول ۱، مبدل ایزوله‌ی فلای‌بک در نقاط کاری مختلف در هر دو مد پیوسته و ناپیوسته توسط نرم افزار MATLAB شبیه‌سازی شده است. همچنین با پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌ها توسط پردازنده سیگنال

دیجیتال TMS320F2810 ساخت شرکت تگزاس نتایج آزمایشگاهی مورد نظر استخراج شده است. اندازه‌گیری جریان سلف و ولتاژ خروجی مبدل توسط سنسورهای ایزوله‌ی اثر هال و IL300 صورت گرفته است. فرکانس کلیدزنی مبدل حدود 10kHz و فرکانس نمونه برداری حدود 150kHz انتخاب شده است. تصویر مجموعه آزمایشگاهی استفاده شده در شکل ۳ آورده شده است. شایان ذکر است که با توجه به واحد بودن نسبت تبدیل ترانسفورماتور ایزوله، جریان سلف مبدل از مجموع جریان‌های سوئیچ در ورودی و دیود در خروجی ترانسفورماتور ساخته می‌شود.

#### ۵-۱- نتایج شبیه‌سازی

##### ۵-۱-۱- تغییرات مقاومت بار

در این حالت، پس از راه‌اندازی منبع تغذیه به ازای مقادیر نامی، مقدار مقاومت بار از  $R = 200$  اهم (نامی) به  $R = 100$  اهم در لحظه‌ی  $t = 0.2^s$  تغییر داده شده است. به ازای ولتاژ مرجع ۱۸ ولتی، شکل موج ولتاژ خروجی در شکل ۴ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در لحظه‌ی راه‌اندازی و افزایش ولتاژ خروجی کنترل‌کننده‌ی تطبیقی فراجهدش کمتری داشته و دارای پاسخ دینامیکی سریعتری است. با این حال، پس از تغییر مقاومت بار، کنترل مدلفزشی پاسخ دینامیکی سریعتری دارد که نشان دهنده‌ی مقاومت بالای این کنترل‌کننده نسبت به تغییرات بار خروجی است. همچنین در هر دو روش کنترلی خطای حالت ماندگار در نقاط کاری مختلف صفر است.

##### ۵-۱-۲- تغییرات ولتاژ ورودی مبدل

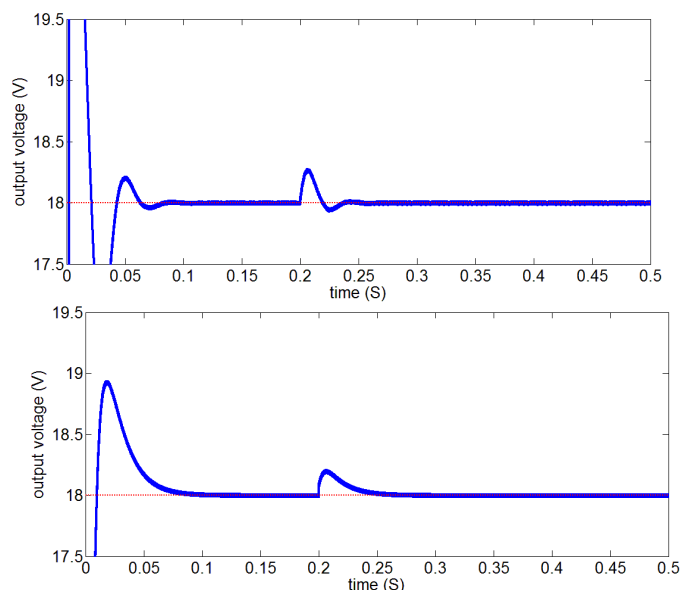
در این آزمایش با در نظر گرفتن شرایط نامی، منبع تغذیه راه‌اندازی می‌شود که پاسخ این بخش دقیقاً مانند نتیجه‌ی ارائه شده در شکل ۴ است. پس از رسیدن پاسخ به حالت ماندگار، در لحظه‌ی  $t = 0.2^s$  ولتاژ ورودی مبدل بصورت پله‌ای از  $12^V$  به  $17^V$  تغییر داده شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۵، ملاحظه می‌شود که پاسخ هر دو نوع کنترل‌کننده در این حالت پایدار بوده و خطای حالت ماندگار صفر است. همانطوری که ملاحظه می‌شود در این حالت هر دو کنترل‌کننده پاسخ دینامیکی تقریباً یکسانی دارند.

#### ۵-۲- نتایج عملی

##### ۵-۲-۱- تغییرات همزمان مقاومت بار، ولتاژ ورودی و

##### خازن فیلتر خروجی

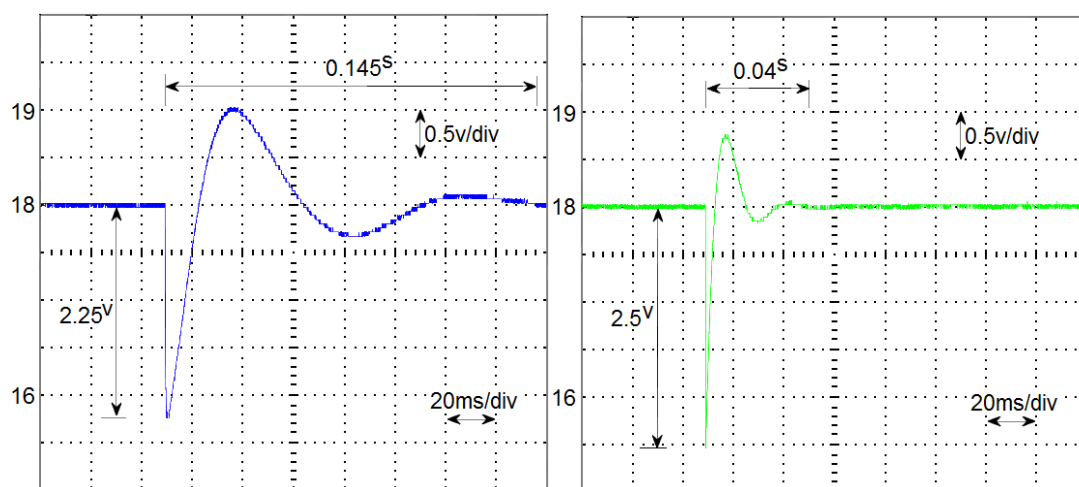
به منظور ارزیابی کامل پاسخ روش‌های کنترلی طراحی شده و اطمینان از پایداری آن‌ها در شرایط کاری متفاوت، در این آزمایش پارامترهای اصلی مبدل بصورت همزمان در محدوده‌ی کاری وسیعی تغییر داده



الف) ولتاژ خروجی در کنترل کننده تطبیقی

ب) ولتاژ خروجی در کنترل کننده مد لغزشی

شکل (۵): پاسخ کنترل کننده‌های موردنظر نسبت به تغییرات ولتاژ ورودی-فرض می‌شود که در لحظه  $t = 0.2^s$  ولتاژ ورودی از  $12^V$  به  $17^V$  به صورت پله‌ای تغییر داده شده است. (با توجه به یکسان بودن پاسخ‌های حلقه بسته در لحظه راه‌اندازی با شکل (۴) و به منظور بزرگنمایی تغییرات ولتاژ خروجی در لحظه تغییر ولتاژ ورودی، از ارائه جزئیات پاسخ در لحظه راه‌اندازی صرف نظر شده است.)



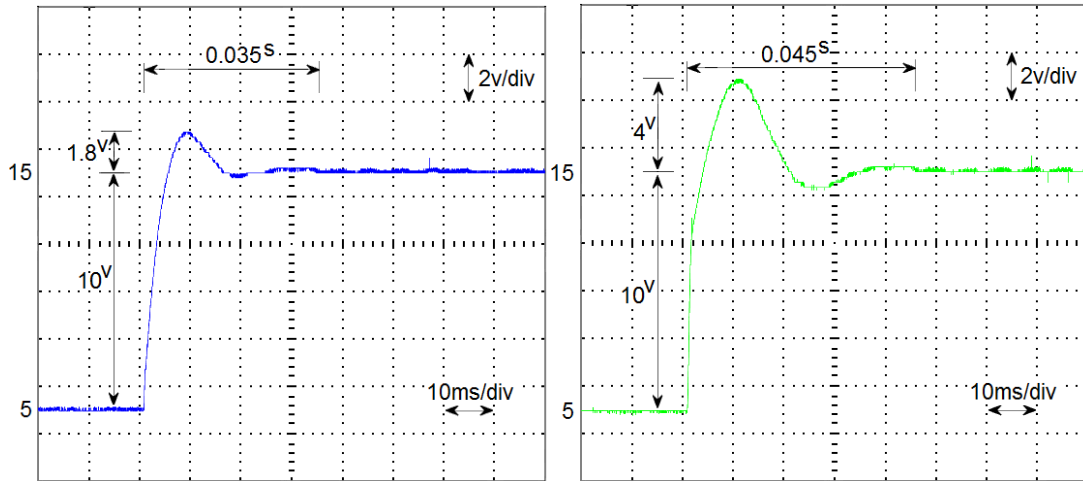
ب) تغییرات ولتاژ خروجی در کنترل کننده تطبیقی

الف) تغییرات ولتاژ خروجی در کنترل کننده مد لغزشی

شکل (۶): پاسخ عملی (آزمایشگاهی) کنترل کننده‌های طراحی شده به تغییرات همزمان ولتاژ ورودی، خازن فیلتر و بار- فرض شده است که در یک لحظه معین پارامترهای سیستم از  $V_{in} = 12^V, R = 200^{\Omega}$  و  $C = 330^{\mu F}$  به  $V_{in} = 17^V, R = 100^{\Omega}$  و  $C = 660^{\mu F}$  به صورت پله‌ای تغییر داده شده است.

ولتاژ خروجی افت زیادی داشته است. با توجه به نتایج عملی ارائه شده در شکل ۶، ملاحظه می‌شود که هر دو کنترل کننده پاسخ پایداری به تغییرات اعمال شده دارند و قادر به حفظ ولتاژ خروجی در مقدار مرجع ۱۸ ولتی پس از اعمال تغییرات نسبتاً زیاد می‌باشند. همچنین مشابه نتایج شبیه‌سازی ارائه‌شده، ملاحظه می‌شود که کنترل کننده‌ی مد

می‌شوند. فرض می‌شود که پارامترهای برشگر از  $R = 200^{\Omega}$ ،  $V_{in} = 12^V$  و  $C = 330^{\mu F}$  به  $V_{in} = 17^V$ ،  $R = 100^{\Omega}$  و  $C = 660^{\mu F}$  تغییر داده شده‌اند. افزایش ظرفیت خازن از  $C = 330^{\mu F}$  به  $C = 660^{\mu F}$  با موازی نمودن یک خازن ۳۳۰ میکروفارادی بدون شارژ در لحظه تغییرات پارامترهای مدل صورت پذیرفته است. به دلیل دشارژ بودن خازن اضافه شده به مدار در لحظه اعمال تغییرات،



شکل (۷): پاسخ کنترل کننده‌های مورد مطالعه نسبت به تغییرات ولتاژ مرجع از  $+5V$  به  $+15V$   
 الف) تغییرات ولتاژ خروجی در کنترل کننده مد لغزشی ب) تغییرات ولتاژ خروجی در کنترل کننده تطبیقی

بیش از روش گام به گام به عقی تطبیقی است؛ هر دو کنترل کننده نسبت به تغییرات ولتاژ ورودی پاسخ تقریباً یکسانی دارند. مقایسه قوانین کنترلی نهایی به وضوح نشان می‌دهد که پیاده‌سازی عملی کنترل کننده‌ی مد لغزشی ساده‌تر از روش دیگر می‌باشد. همچنین با توجه به نحوه‌ی تعریف مقدار مرجع سیستم، خطای خروجی در هر دو روش طرح شده صفر خواهد بود.

### سپاسگزاری

این تحقیق توسط دانشگاه آزاد اسلامی واحد اردبیل در قالب یک طرح تحقیقاتی حمایت شده است و بدین وسیله از کلیه‌ی مسئولان و کارکنان حوزه‌ی معاونت پژوهشی سپاسگزاری می‌شود.

### مراجع

- [1] M. Salimi and A. L. Eghlim, "Passivity-based control of the DC-DC buck converters in high-power applications," TENCON 2014, IEEE Region 10 Conference, Bangkok, pp. 1-6, 2014.
- [2] M. Salimi and S. Siami, "Cascade nonlinear control of DC-DC buck/boost converter using exact feedback linearization," Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), 4th International Conference on, Sharjah, pp. 1-5, 2015.
- [3] L. Shen, D. D. C. Lu and C. Li, "Adaptive sliding mode control method for DC-DC converters," IET Power Electronics, vol. 8, no. 9, pp. 1723-1732, 9 2015.
- [4] N. Mukherjee and D. Strickland, "Control of Cascaded DC-DC Converter-Based Hybrid Battery Energy Storage Systems—Part II: Lyapunov Approach," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, no. 5, pp. 3050-3059, May 2016.

[۵] علی حسامی نقشبندی، فرشید حبیبی، حسن بیورانی، "طراحی یک کنترل کننده مقاوم برای پایداری ولتاژ یک ریزشبه در حالات مختلف کاری"، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال دهم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۳۹۲.

لغزشی طراحی شده نسبت به تغییرات پارامترهای مبدل مقاوم‌تر می‌باشد.

### ۵-۲-۲- تغییرات ولتاژ مرجع خروجی

به منظور مقایسه‌ی پاسخ کنترل کننده‌های مورد مطالعه در هنگام تغییرات ولتاژ خروجی، با در نظر گرفتن پارامترهای نامی مبدل مورد نظر، در این آزمایش تغییرات پله‌ای در ولتاژ مرجع خروجی اعمال شده است. در حقیقت در یک لحظه‌ی دلخواه ولتاژ مرجع از  $+5V$  به  $+15V$  تغییر داده شده است. با توجه به نتایج عملی ارائه شده در شکل ۷، ملاحظه می‌شود که پاسخ کنترل کننده‌های طراحی در محدوده‌ی کاری وسیعی از ولتاژ مرجع خروجی پایدار است. همچنین، پاسخ دینامیکی روش تطبیقی سریعتر از روش مد لغزشی است. شایان ذکر است که کلیه‌ی نتایج به ازای  $K_I = 1000$ ،  $\eta = 1$ ،  $h_1 = 25 \times 10^4$  و  $h_2 = 2 \times 10^3$  و  $\gamma_{11} = \gamma_{22} = \gamma_{33} = 1 \times 10^{-5}$  به دست آمده‌اند.

### ۶- نتیجه‌گیری

با در نظر گرفتن نتایج آزمایشگاهی در حالت ماندگار و گذرا و به ازای اغتشاشات ناشی از تغییر منبع ورودی و بار، در این مقاله پاسخ کنترل-کننده‌های مد لغزشی و تطبیقی در منبع تغذیه‌ی ایزوله‌ی فلای یک مطالعه شده است. اصول طراحی مرحله به مرحله‌ی کنترل کننده‌ها و معیارهای انتخاب ضرایب کنترلی در روش مد لغزشی به تفصیل آورده شده است. همچنین قوانین تطابق مناسبی برای تخمین ولتاژ ورودی و مقاومت بار در طراحی تطبیقی ارائه شده است. با در نظر گرفتن توابع لیاپانوف مناسبی، پایداری کنترل کننده‌ها در محدوده‌ی کاری وسیعی از تغییرات اثبات شده است. ملاحظه می‌شود که کنترل کننده‌ی مد لغزشی پاسخ مقاوم‌تری نسبت به تغییرات بار دارد؛ فراجهدش پاسخ در لحظه‌ی تغییرات خروجی و راه‌اندازی منبع تغذیه در روش مد لغزشی

- [19] R. Ling, D. Maksimovic and R. Leyva, "Second-Order Sliding-Mode Controlled Synchronous Buck DC-DC Converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 3, pp. 2539-2549, March 2016.
- [20] Yazici and E. K. Yaylaci, "Fast and robust voltage control of DC-DC boost converter by using fast terminal sliding mode controller," *IET Power Electronics*, vol. 9, no. 1, pp. 120-125, 1 20 2016.
- [21] Jean-Jacques E. Slotine, Weiping Li, *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall, 1991.
- [22] M. Shirazi, R. Zane and D. Maksimovic, "An Autotuning Digital Controller for DC-DC Power Converters Based on Online Frequency-Response Measurement," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 11, pp. 2578-2588, Nov. 2009.

## زیر نویس ها

- <sup>1</sup> Backstepping
- <sup>2</sup> Robustness
- <sup>3</sup> Digital signal processor
- <sup>4</sup> Choppers
- <sup>5</sup> Regulation
- <sup>6</sup> Variable structure
- <sup>7</sup> Chattering
- <sup>8</sup> Non-minimum phase
- <sup>9</sup> Utkin
- <sup>10</sup> Estimation rules

- [6] R. Haroun, A. El Aroudi, A. Cid-Pastor, G. Garcia, C. Olalla and L. Martínez-Salamero, "Impedance Matching in Photovoltaic Systems Using Cascaded Boost Converters and Sliding-Mode Control," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 6, pp. 3185 – 3199, June 2015.
- [7] M. Bensaada and A. Boudghene Stambouli, "A practical design sliding mode controller for DC-DC converter based on control parameters optimization using assigned poles associate to genetic algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 53, pp. 761-773, December 2013.
- [8] S. Hemant Chincholkar and C. Y. Chan, "Design of Fixed-Frequency Pulsewidth-Modulation-Based Sliding-Mode Controllers for the Quadratic Boost Converter," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 64, no. 1, pp. 51 – 55, Jan. 2017.
- [9] R. Pradhan and B. Subudhi, "Double Integral Sliding Mode MPPT Control of a Photovoltaic System," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 24, no. 1, pp. 285 – 292, Jan. 2016.
- [10] Mahdi Salimi and Vadood Hajbani, "Sliding-mode control of the DC-DC flyback converter in discontinuous conduction mode" *Power Electronics, Drives Systems & Technologies Conference (PEDSTC)*, 3-4 Feb. 2015.
- [11] H. K. Iqbal and G. Abbas, "Design and analysis of SMC for second order DC-DC flyback converter," *17th IEEE International Multi Topic Conference, Karachi, 2014*, pp. 533-538, 2014.
- [12] Yu Wu, Yigeng Huangfu, Rui Ma, Alexandre Ravey, Daniela Chrenko, "A strong robust DC-DC converter of all-digital high-order sliding mode control for fuel cell power applications," *Journal of Power Sources*, Volume 413, 2019, Pages 222-232

[۱۳] همتی رضا، کوفیگر حمید رضا، عطایی محمد. "کنترل کننده تطبیقی مدل مرجع بهبود یافته نرمالیزه شده برای UPFC." *مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران*. ۱۳۹۴؛ ۱۲ (۱): ۱۵۳-۱۳۹.

[۱۴] تودجی حمیدرضا. "استفاده از اینورتر چندسطحی با کنترل کننده غیر خطی مستقیم برای اتصال مزرعه خورشیدی به شبکه." *مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران*. ۱۳۹۷؛ ۱۵ (۱): ۷۴-۶۵.

- [15] S. A. Akbarabadi, H. Atighechi and J. Jatskevich, "Corrected state-space averaged-value modeling of second-order flyback converter including conduction losses," *26th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, Regina, SK, 2013, pp. 1-4, 2013.
- [16] L. Cao, K. H. Loo and Y. M. Lai, "Output-Impedance Shaping of Bidirectional DAB DC-DC Converter Using Double-Proportional-Integral Feedback for Near-Ripple-Free DC Bus Voltage Regulation in Renewable Energy Systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 3, pp. 2187-2199, March 2016.
- [17] C. Chan, S. H. Chincholkar and W. Jiang, "Adaptive Current-Mode Control of a High Step-Up DC-DC Converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 9, pp. 7297-7305, Sept. 2017.
- [18] S. Chincholkar; C. Y. Chan, "Design of fixed-frequency pulse-width-modulation based sliding-mode controllers for the quadratic boost converter," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, no.99, pp.1-1, 2016.

